

La resonancia magnética protónica: un nuevo método geofísico para los hidrogeólogos

Resumen

Introducción

Principio de la resonancia magnética

El equipo "Numis"

Realización de un sondeo

Ejemplos de resultados de experimentos

Conclusión

Referencias bibliográficas

La resonancia magnética protónica: un nuevo método geofísico para los hidrogeólogos

Beauce, A. ⁽¹⁾, Legchenko, A. ⁽¹⁾, Guillen, A. ⁽¹⁾

RESUMEN

El método basado sobre la Resonancia Magnética Protónica (RMP) es conocido desde el principio de los años ochenta (Semenov et al., 1987). Desde la superficie, este método permite una detección directa del agua contenida en el suelo al contrario de los otros métodos geofísicos aplicados en hidrogeología. Es selectivo y típicamente no hay otros núcleos atómicos que los protones que sean solicitados por la corriente emitida por el aparato: la presencia o la ausencia de una señal RMP esta directamente relacionada con la presencia o la ausencia de agua. Además, el procesamiento de las señales de RMP puede producir otras informaciones útiles para los hidrogeólogos, tales como la distribución del contenido de agua y una caracterización de los acuíferos en función de la profundidad.

Un nuevo instrumento (NUMIS) basado sobre la RMP fué recientemente desarrollado en el marco de una colaboración entre el BRGM, IRIS Instruments y la Academia de Ciencias Rusa. Actualmente este equipo permite una investigación hasta unos 100 m de profundidad. Se presentan varios experimentos metodológicos realizados con este equipo en diferentes medios hidrogeológicos.

INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos tradicionales de exploración de los recursos de agua se basan en el análisis de anomalías de estructuras o de parámetros físicos en relación con diferentes factores que no son necesariamente relacionados de manera única con la presencia o la ausencia de agua en el medio analizado. Así, por ejemplo, la conductividad eléctrica (inversa de la resistividad) sí es proporcional a la conductividad eléctrica del fluido y a una cierta potencia de la porosidad, pero existen también rocas tales como las arcillas o los esquistos, cuya conductividad esta relacionada con sus características mineralógicas. Además, en el caso de las arcillas, el agua absorbida ligada esta relacionada con la porosidad de la matriz. Igualmente, la porosidad de la matriz influye sobre la velocidad de las ondas sísmicas, así como el grado de fracturación que es un factor determinante para la permeabilidad; otros fenómenos estructurales pueden también contribuir a modificar este último parámetro sin que haya una relación cualquiera con la presencia de agua.

Al contrario de estos métodos geofísicos, la información deducida de un sondeo de resonancia magnética protónica esta directamente relacionada con la presencia del agua en el subsuelo. En el marco de una colaboración entre el BRGM y la Academia de Ciencias Rusa, un equipo llamado "NUMIS" basado sobre este principio fué desarrollado por IRIS Instruments y comercializado en 1997.

PRINCIPIO DE LA RESONANCIA MAGNÉTICA PROTÓNICA

De manera esquemática, el principio físico de la RMP se basa en el hecho de que los núcleos de hidrógeno situados en un campo magnético tal como el de la Tierra, poseen unos momentos magnéticos que, en equilibrio, están alineados en la dirección de este campo magnético natural. La emisión de un campo magnético perturbador a una frecuencia específica (frecuencia de Larmor) modifica este equilibrio e induce una precesión de estos momentos alrededor de la dirección del campo magnético natural.

Después de cortar la emisión del campo excitante, durante el periodo de vuelta al estado de equilibrio inicial, los protones emiten un campo magnético de relajación que puede ser medido en la superficie, constituyendo la señal de RMP.

Cuanto más intensa es la señal RMP, mayor es el número de protones que han entrado en resonancia, y mas importante es el contenido de agua. La frecuencia específica a la cual los protones son excitados asegura que el método sea selectivo. Los núcleos de hidrógeno presentes en el subsuelo provienen en gran mayoría de las moléculas de agua, lo que demuestra que la RMP proporciona información directamente relacionada con el agua del subsuelo investigado.

EL EQUIPO "NUMIS"

En el marco de un colaboración entre el BRGM y la Academia de Ciencias Rusa, un equipo llamado "NUMIS" basado sobre este principio fue desarrolla-

⁽¹⁾ BRGM, DR/LGE, 3, av. Cl. Guillemin, BP 6009, 45060 ORLEANS Cedex 2, FRANCE

do por IRIS Instruments y comercializado en 1997. Este equipo se compone de un generador de corriente alterna, una unidad de recepción, un unidad de detección de señal RMP, una antena y un microprocesador. Este último controla la conmutación de la antena del modo emisión de la corriente al modo recepción de las señales RMP.

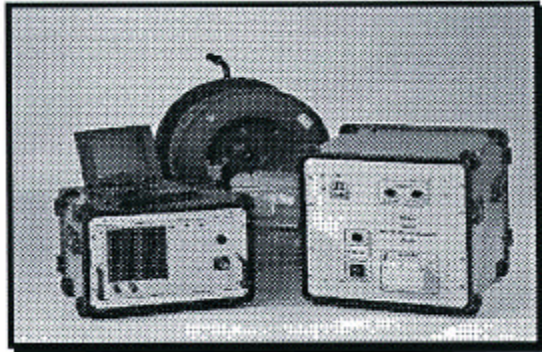


Figura 1: El equipo de Resonancia Magnética Protónica "NUMIS"

Un micro-ordenador portátil se encarga de la adquisición de los datos y del procesamiento. La corriente emitida puede variar de 1 A hasta 250 A. La señal mínima que se puede medir se sitúa alrededor de 10 nV. Sin embargo, este nivel depende mucho de la relación señal/ruido del lugar donde se realiza un sondeo.

REALIZACION DE UN SONDEO

Para realizar un sondeo de RMP, se despliega una antena en la superficie del suelo, generalmente en forma de círculo. El diámetro puede variar entre 20 m y 100 m según la profundidad de los acuíferos que se quieren investigar; varios tamaños o geometrías de antenas están considerados en el sistema de adquisición de datos de NUMIS.

Un pulso de corriente alterna $i(t)$ es emitido en esta antena:

$$i(t) = I_0 \cos(\omega_0 t), 0 < t \leq \tau$$

I_0 y τ caracterizan respectivamente la amplitud y la duración del pulso de corriente. La frecuencia de la corriente ω_0 corresponde a la frecuencia de Larmor de los protones situados en el campo geomagnético del lugar investigado. El valor de esta frecuencia se deduce de la amplitud del campo magnético del lugar explorado. Después de cortar la inyección de la corriente, se puede registrar la señal RMP emitida por los protones. Prácticamente, la señal RMP sólo se puede registrar después de un plazo instrumental (llamado "tiempo muerto") de 35 ms en la versión actual de NUMIS. Esta señal tiene una frecuencia igual a la de la corriente inyectada y tiene una forma exponencial decreciente en función del tiempo (figura 2):

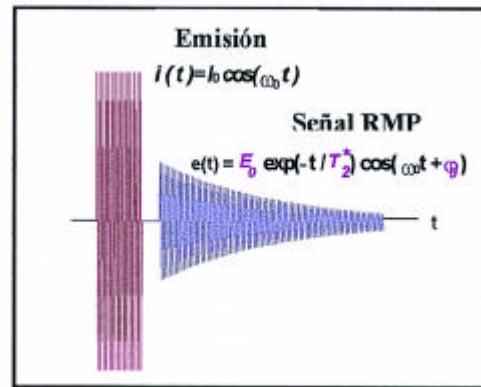


Figura 2: Esquema de una secuencia emisión-recepción en función del tiempo.

$e(t) = E_0 \exp(-t/T_2^*) \cos(\omega_0 t + j_0)$, con E_0 la amplitud inicial, T_2^* el tiempo de decaimiento, y j_0 la fase de la señal RMP.

Cambiando la intensidad I_0 y la duración τ del pulso de corriente, se miden la amplitud $E_0(q)$ y el tiempo de decaimiento $T_2^*(q)$ de la señal de RMP en función del momento del pulso $q = I_0 \tau$; este último parámetro actúa sobre la profundidad de investigación del sondeo. En la práctica, para disminuir la influencia del ruido, se realiza una serie de acumulaciones de las señales RMP obtenidas para cada valor del parámetro q .

Así, los 3 parámetros, $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ y $j_0(q)$ son los parámetros medidos fundamentales que caracterizan las señales RMP de un sondeo. Estos parámetros son interpretados, e informan sobre la ausencia de agua o su presencia en el subsuelo. Procesándolos se pueden determinar informaciones complementarias útiles para los hidrogeólogos (Legchenko et al., 1998):

- A partir de las amplitudes iniciales $E_0(q)$ se puede determinar una distribución del contenido de agua en el subsuelo en función de la profundidad. Varios parámetros pueden influir sobre las amplitudes de las señales RMP tales como la magnitud y la inclinación del campo geomagnético, la conductividad eléctrica del suelo, el tamaño y la geometría de la antena utilizada (Legchenko et al., 1997).
- Los tiempo de decaimiento $T_2^*(q)$ están relacionados con el tamaño promedio de los poros de las formaciones acuíferas. La interpretación de los tiempos de decaimiento en función de la profundidad se basa en un modelo empírico propuesto por Schirov et al., 1991. Según este modelo, el agua absorbida produce señales cuyos tiempos de decaimiento son inferiores a 30 ms; en cuanto al agua "libre" que se puede extraer produce señales cuyos T_2^* son comprendidos entre 30 et 1 000 ms.
- Las fases $j_0(q)$ procuran información sobre las conductividades eléctricas del subsuelo. La profundidad de investigación de un sondeo de RMP puede

Tiempos de decaimiento (ms)	Tipos de formaciones acuíferas
< 30	Arcillas
30 – 60	Arenas muy finas
60 – 120	Arenas finas
120 – 180	Arenas medianas
180 – 300	Arenas gruesas y gravas
300 – 600	Gravas
600 – 1000	Agua "libre"

ser reducida cuando estas conductividades son inferiores a 10 ohm.m. Se tiene que tener en cuenta esta información durante el proceso de inversión de los datos de RMP para obtener una estimación precisa de las profundidades de las formaciones acuíferas.

El volumen interesado por un sondeo de RMP se puede definir como un cilindro vertical de diámetro igual a 1,5 veces el diámetro de la antena utilizada y de altura igual a este diámetro. Según las condiciones ambientales de ruidos electromagnéticos, se requiere unas 2 horas para realizar un sondeo.

EJEMPLOS DE RESULTADOS DE EXPERIMENTOS

A - El primer ejemplo se refiere a un experimento metodológico realizado en el suroeste de Francia, sobre la duna del Pyla, situada a orillas del Atlántico a unos 50 km de Bordeus. El contexto hidrogeológico de este sitio es bastante simple: una sola capa de arena y el nivel hidrostático está controlado por el nivel del mar. Sobre esta duna un perfil aproximadamente perpendicular a la costa de 4 sondeos RMP es

realizado (figura 3). Una misma antena cuadrada de 75 m de ancho es utilizada para todos los sondeos. Las altitudes de los sondeos varían de 20 m para el sondeo Pyla_1 hasta unos 95 m para el sondeo Pyla_3. La figura 4 presenta las amplitudes RMP medidas para cada uno de estos 4 sondeos en función del momento del pulso. Estas amplitudes van disminuyendo a medida que los sondeos se sitúan a altitudes más grandes, y que, correlativamente, las contribuciones del agua a las señales de RMP son menores. Este experimento permite comprobar que el método RMP es directamente sensible al agua contenida en el suelo.

B - Este ejemplo presenta resultados de calibración de 3 sondeos de RMP realizados en Francia cerca de pozos productivos cuyos acuíferos se ubican todos en la caliza cuyos grados de fracturación son variables. Las profundidades de estos acuíferos se sitúan alrededor de 20 m, y los caudales respectivos de estos pozos varían entre 2,2 m³/h hasta 70 m³/h. Las amplitudes de las señales de RMP, así como los tiempos de decaimiento, están presentados en una misma figura para compararlos (figura 5).

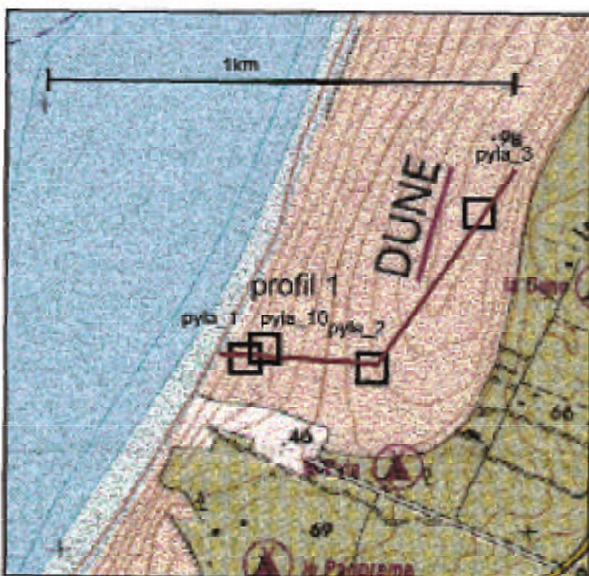


Figura 3: Plano de ubicación de los sondeos de RMP realizados sobre la duna del Pyla.

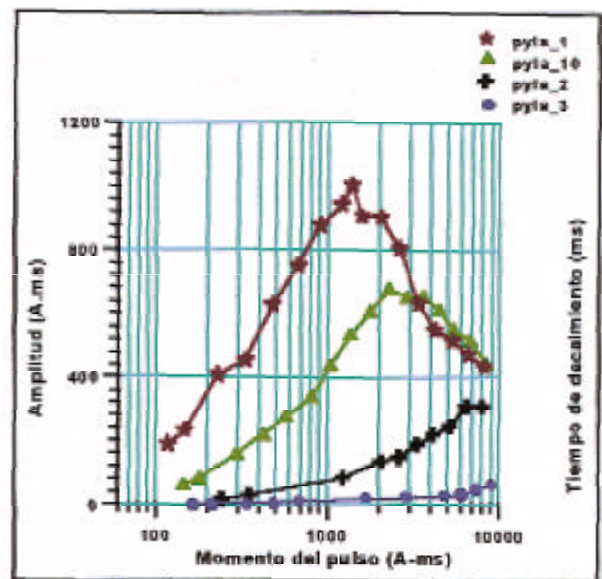


Figura 4: Amplitudes RMP medidas en función del momento del pulso en 4 sondeos.

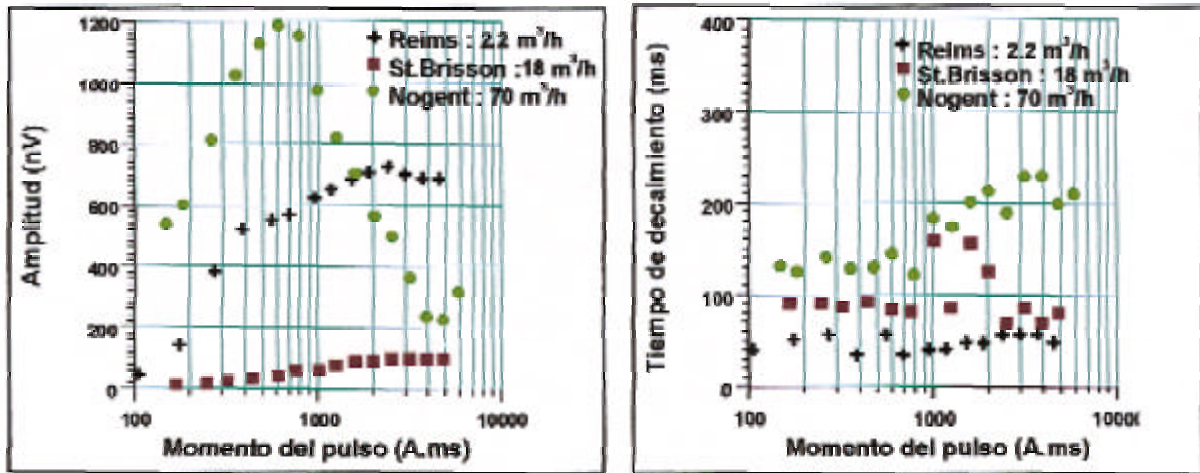


Figura 5: Amplitudes (izquierda) y tiempos de decaimiento (derecha) en función del momento del pulso medidos en 3 sondeos RMP situados alrededor de pozos. Acuíferos localizados en caliza con grados de fracturación variables.

En primer lugar, considerando el sondeo de RMP de Nogent realizado al lado del pozo con mayor caudal, las amplitudes (1200 nV) y los tiempos de decaimiento (≈ 180 ms) son superiores a los de los dos otros sitios. Por estos últimos se puede notar que las amplitudes del sondeo RMP de Reims son más importantes que las amplitudes del sondeo de St Brisson, cuando los caudales respectivos de los pozos son inversos. Una interpretación correcta de los sondeos RMP necesita tener también en cuenta los tiempos de decaimiento. Por este caso se observa que el sondeo de St Brisson presenta tiempos de decaimiento significativamente superiores (≈ 100 ms) a los del sondeo de Reims (≈ 50 ms); esto significa que el tamaño promedio de los poros es más importante en el caso de St Brisson y, correlativamente, también la conductividad hidráulica.

C - Ocho sondeos de RMP fueron realizados en Arabia Saudita, en un contexto geológico compuesto de granito alterado y fracturado, cerca de pozos cuyos caudales se extendían entre 0 hasta $22 \text{ m}^3/\text{h}$. Estos son-

deos tenían como objetivo calibrar las respuestas RMP. Otros sondeos complementarios fueron también realizados a lo largo de perfiles y los resultados están detallados en Legchenko et al., 1998. La figura 6 presenta un corte estratigráfico de un pozo en asociación con la distribución del contenido de agua en función de la profundidad deducida del sondeo de RMP correspondiente: se puede notar que la profundidad del nivel hidrostático deducido por la RMP corresponde con la información proporcionada por el pozo. Al igual que en el caso previo, se presentan también las curvas de amplitudes RMP en función del momento del pulso obtenidas al lado de 2 pozos de caudales distintos: las amplitudes RMP más importantes están observadas al lado del pozo con mayor caudal. Teniendo en cuenta que en este caso, todos los tiempos de decaimiento de los sondeos de RMP realizados al lado de los pozos eran similares (≈ 120 ms), una interpretación basada solamente sobre las variaciones de las amplitudes puede permitir determinar las zonas potencialmente interesantes para ubicar pozos productivos. Esta calibración, realizada en un contex-

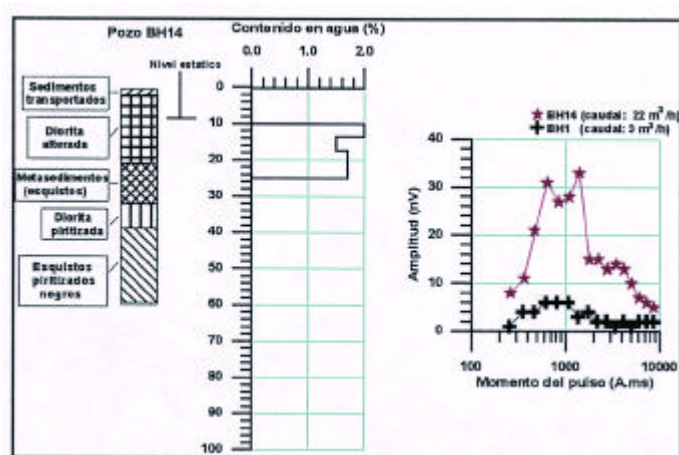


Figura 6: Comparación entre las informaciones

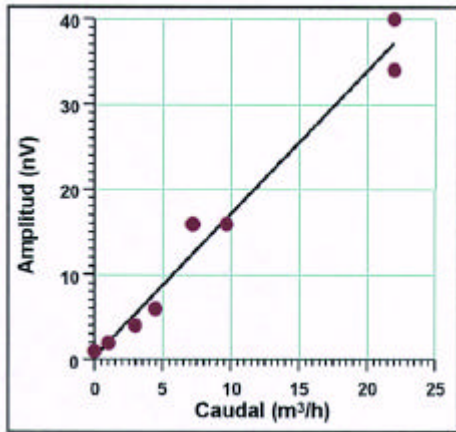


Figura 7: Correlación entre las amplitudes de un pozo y los resultados de RMP RMP y los caudales de pozos.

to geológico homogéneo, ha permitido determinar una relación lineal entre los caudales de los pozos y las amplitudes máximas de RMP (figura 7).

D - Para este experimento situado en Chipre, unos 26 sondeos de RMP fueron realizados a lo largo de perfiles que cruzaban una falla conocida (figura 8). Esta falla delimita 2 zonas: al norte, los acuíferos están situados en formaciones de arenisca fracturada; al sur están localizados en formaciones de arrecife calcáreo. Variaciones en las amplitudes y los tiempos de decaimiento de más de cinco veces se han podido observar entre los sondeos situados al norte de esta falla en comparación con los que están situados al sur. La figura 8 presenta una síntesis de estos resultados: respuestas RMP características de cada zona se pudieron determinar. Esas características permitieron delimitar precisamente la zona de falla.

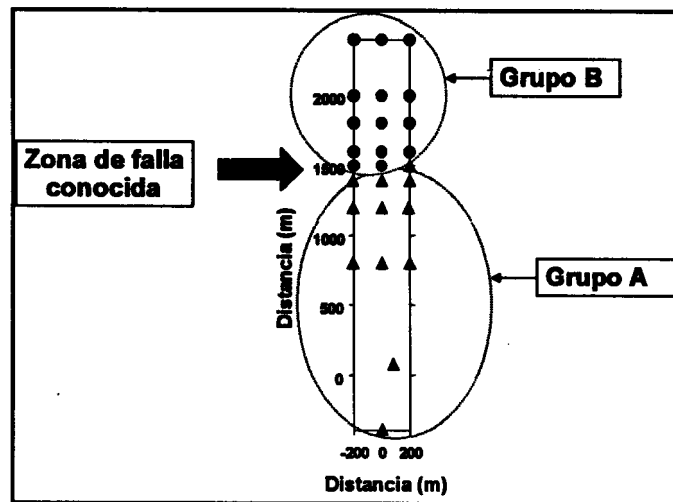


Figura 8: Plano de situación de los sondeos RMP.

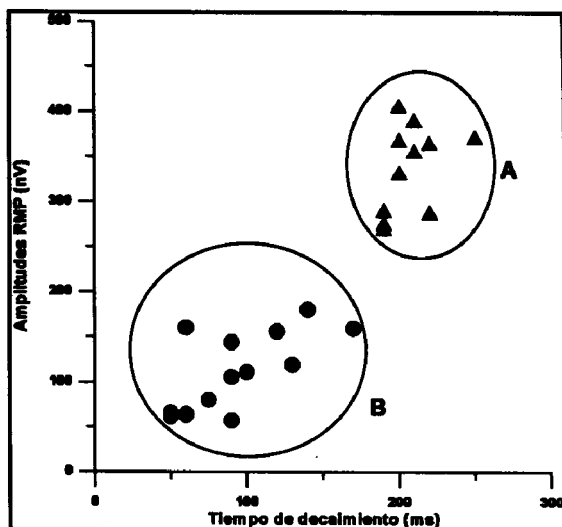


Figura 9: Diagrama de amplitudes en función de los tiempos de decaimiento de estos sondeos.

CONCLUSIÓN

El nuevo equipo de resonancia magnética protónica "NUMIS" amplía la gama de métodos geofísicos aplicados a la exploración de recursos de agua.

La originalidad del método reside en que es directamente sensible al agua contenida en el subsuelo: esta originalidad viene a completar los otros métodos geofísicos actualmente utilizados para este propósito. Los ejemplos presentados muestran que puede proveer informaciones útiles para los hidrogeólogos y contribuir a la elaboración de modelos hidrogeológicos más constreñidos y a una ubicación óptima de pozos productivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LEGCHENKO, A.V. & SHUSHAKOV, O. A. 1998. Inversion of surface NMR data, *Geophysics*, Vol. 63, n°1, pp. 75-84.

LEGCHENKO, A.V., BALTASSAT, J.M., BEAUCE, A., MAKKI, M., AL-GAYDI, B., 1998. Application of the surface proton magnetic resonance method for the detection of fractured granite aquifers, Proceedings of the 4rd Meeting on Environmental and Engineering Geophysics, Septembre 98, Barcelona (Spain), 8-11 sept. 1998, pp. 163-166

LEGCHENKO, A. V., BALTASSAT, J. M., BEAUCE, A., CHIGOT, D., 1997. Application of proton magnetic resonance for detection of fractured chalk aquifers from the surface, Proceedings of the 3rd Meeting on Environmental and Engineering

Geophysics, Aarhus (Denmark), 8-11 sept. 1997, pp. 115-118.

LEGCHENKO A.V., BEAUCE, A., GUILLEN, A., VALLA, P., BERNARD, J., 1997. Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface, European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 2, pp. 173-190.

SCHIROV, M., LEGCHENKO, A., CREER, G., 1991 - New direct non-invasive ground water detection technology for Australia, Expl. Geophys., Vol. 22, pp. 333-338.